

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СЕКЦИЯ СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ РЕЗОНАТОРАМИ (325 МГц) ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ИНЖЕКЦИОННОГО КОМПЛЕКСА ПРОЕКТА NICA

М. В. Лалаян<sup>а</sup>, М. А. Гусарова<sup>а, 1</sup>, Т. А. Лозеева<sup>а</sup>, С. М. Полозов<sup>а</sup>,  
В. Л. Шатохин<sup>а</sup>, С. В. Мацьевский<sup>а</sup>, И. Р. Калиева<sup>а</sup>, Я. В. Шашков<sup>а</sup>,  
А. В. Бутенко<sup>б</sup>, Е. М. Сыресин<sup>б</sup>, Е. С. Тамашевич<sup>б</sup>, Г. В. Трубников<sup>б</sup>,  
Д. С. Быченок<sup>б, 2</sup>, А. Е. Сухотский<sup>б</sup>, Г. И. Валынец<sup>б</sup>, А. Гилев<sup>б</sup>,  
Е. А. Гурневич<sup>б</sup>, С. А. Максименко<sup>б</sup>, А. И. Поболь<sup>ð</sup>, А. А. Бурин<sup>ð</sup>,  
В. С. Петраковский<sup>ð</sup>, А. И. Покровский<sup>ð</sup>, И. Л. Поболь<sup>ð</sup>,  
В. Г. Залесский<sup>ð</sup>

<sup>а</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия

<sup>б</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

<sup>ð</sup> Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

<sup>2</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>ð</sup> Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск, Беларусь

С 2015 г. коллаборацией научных институтов России и Республики Беларусь проводится работа по созданию сверхпроводящих ускоряющих резонаторов для нового линейного модульного ускорителя-инжектора LiLac (Light Ion Linac), предназначенного для установки ионного коллайдера на базе нуклotronа проекта NICA (ОИЯИ, Дубна). Развитие технологий высокочастотной сверхпроводимости является ключевой задачей российско-белорусского сотрудничества. В 2023 г. были изготовлены и проведены холодные испытания трех резонаторов (один прототип и два опытных образца). Два резонатора и криомодуль на 4 резонатора в настоящее время разрабатываются совместно с Институтом современной физики (IMP, Ланьчжоу, Китай). В статье приводятся данные о ходе работ по созданию экспериментального стенда, испытаниях резонаторов, результатах моделирования динамики частиц для нескольких схем компоновки канала транспортировки пучка при размещении криомодуля в составе ускорителя инжекционного комплекса.

Since 2015, the superconducting linac-injector development (LiLac, Light Ion Linac) for Nuclotron-based Ion Collider fAcility (NICA) (JINR, Dubna) is carried out by the collaboration of JINR, NRNU MEPhI, INP BSU, PTI NAS of Belarus. The development of the SRF technologies is the key task of the Russian – Belarusian collaboration. Three cavities (one prototype and two test samples) were designed and produced in 2023. Two cavities and cryostat for four cavities are produced by IMP (Lanzhou, China) now. Beam dynamics calculations, the results of tests cavities, and the current results of developing a test facility with superconducting cavities (325 MHz) will be presented.

PACS: 29.27.Ac; 29.27.Bd; 29.20.db

---

<sup>1</sup>E-mail: MAGusarova@mephi.ru

## ВВЕДЕНИЕ

Проект NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility), создаваемый на базе Объединенного института ядерных исследований, предназначен для изучения свойств плотной барионной материи [1, 2]. Комплекс включает в себя: источники нуклонов, линейные ускорители инжекционного комплекса, модернизированный ускоритель нуклotron, коллайдер NICA и исследовательские установки MPD, SPD, BM@N (рис. 1). Модернизация инжекционного комплекса в рамках проекта NICA предусматривает создание нового линейного модульного ускорителя LILac (Light Ion Linac), в который входят секции со сверхпроводящими резонаторами [3] (рис. 2).

Базовая компоновка ускорителя LILac включает источник поляризованных ионов (SPI) и пять секций с резонаторами с нормальной проводимостью: ПОКФ, группирующий резонатор-банчер, две секции IH-1 и IH-2 с резонаторами IH-типа (встречно-штыревые резонаторы) и резонатора-дебанчера. Рабочая частота — 162,5 МГц, начальная энергия на выходе секции IH-2 7 МэВ/нуклон. Повышение энергии в будущем будет обеспечиваться секцией с резонаторами IH-типа (с нормальной проводимостью) IH-3 до 13 МэВ/нуклон и секциями со сверхпроводящими резонаторами HWR1

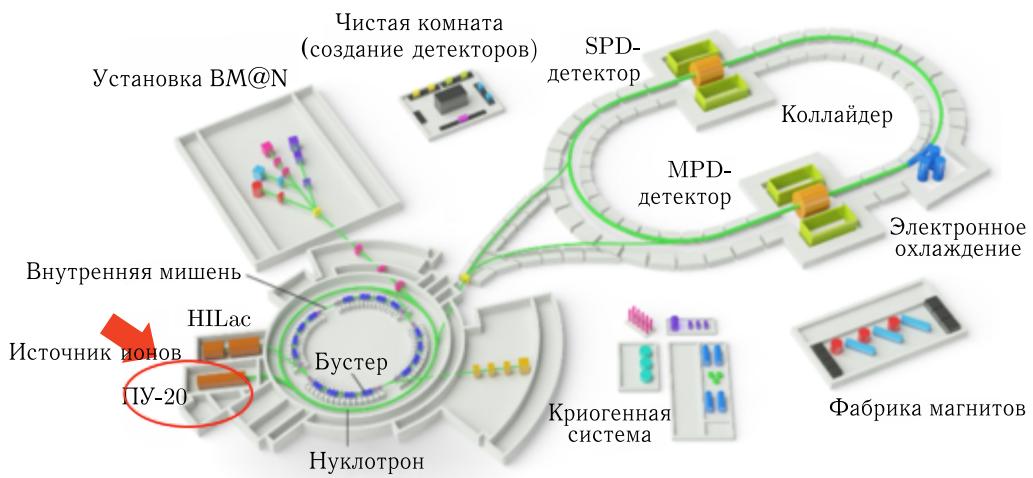


Рис. 1. Ускорительный комплекс NICA

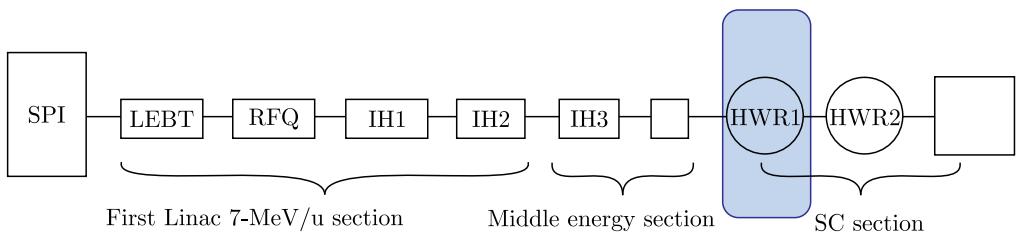


Рис. 2. Общая схема линейного ускорителя инжекционного комплекса сверхпроводящего коллайдера NICA

и HWR2 до 50 МэВ/нуклон [4–6]. Рабочая частота секций со сверхпроводящими резонаторами — 325 МГц.

Работа по созданию сверхпроводящих резонаторов для первой секции HWR1 проводится коллаборацией научных институтов России и Республики Беларусь: ОИЯИ (Россия, Дубна), НИЯУ МИФИ (Россия, Москва), ИЯП БГУ (Беларусь, Минск), ФТИ НАН Беларуси (Беларусь, Минск). Разработка криомодуля на четыре резонатора проводится совместно с Институтом современной физики (IMP, Китай, Ланьчжоу).

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАТОРОВ

В качестве ускоряющих резонаторов для секции HWR1 были выбраны резонаторы на основе полуволновой коаксиальной линии с двойными стенками (рис. 3) для охлаждения гелием с температурой 4,2 К. Резонаторы изготовлены из листового ниобия со средней толщиной 2,5 мм и имеют криостатирующий кожух (3) из титана. Подача гелия осуществляется через порты на кожухе (7), расположенные на верхней крышке резонатора. Ввод мощности и измерительная антенна располагаются в плоскости, перпендикулярной оси пролета пучка (1). Основные электродинамические характеристики (ЭДХ) СП-резонаторов секции HWR1 приведены в табл. 1.

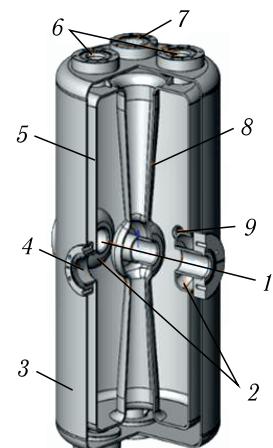


Рис. 3. Геометрия СП-резонатора на основе полуволновой коаксиальной линии для секции HWR1: 1 — ось пролета пучка; 2 — боковые трубы дрейфа; 3 — кожух; 4 — патрубок для УВМ; 5 — внешний проводник резонатора; 6 — патрубки промывочных отверстий; 7 — порт заливки жидкого гелия; 8 — внутренний проводник резонатора; 9 — патрубок для измерительной антенны

Таблица 1. Основные ЭДХ СП-резонаторов секции HWR1

Параметр	Значение
$f$ , МГц	325
$\beta_g$	0,21
$E_p/E_{acc}$	5,9
$B_p/E_{acc}$ , мТл/(МВ/м)	9,6
$R_{sh}/Q_0$ , Ом	306
$G = R_s/Q$ , Ом	57

Изготовление и тестирование резонаторов проводилось в НИИЯП БГУ и ФТИ НАН Беларуси [7–9]. Для проведения работ были разработаны и изготовлены тестовые криостаты, позволяющие проводить как испытания с погружением резонаторов в жидкий гелий на этапе изготовления без криостатического кожуха (рис. 4, *а*), так и финальные испытания резонаторов в сборе с криостатирующим кожухом (рис. 4, *б*). Изготовлены три резонатора: прототип и два опытных образца. Проведены испытания на низких уровнях мощности, до значений ускоряющего поля порядка  $10^{-1}$  МВ/м. На рис. 5 приведен полученный в ходе испытаний график зависимости добротности от величины напряженности поля на оси резонатора для прототипа. Измерения на уровне высокой мощности требуют соответствующей радиационной защиты и будут проведены в Институте современной физики.

Общая схема криомодуля, разрабатываемого ОИЯИ совместно с Институтом современной физики для экспериментального стенда со сверхпроводящими резонаторами линейного ускорителя инжекционного комплекса проекта NICA, представлена на рис. 6. В табл. 2 приведены основные параметры криомодуля. Криомодуль включает в себя 4 резонатора и соленоид, расположенный внутри криостата.

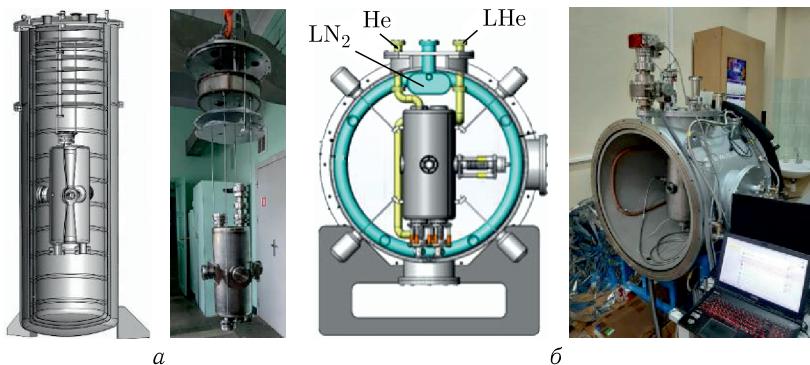


Рис. 4. Тестовые криостаты: *а*) погружной криостат; *б*) криостат с подачей гелия в кожух резонатора

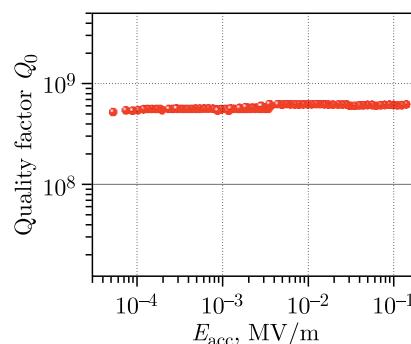


Рис. 5. Зависимость добротности от напряженности поля на оси резонатора при температуре 4,2 К

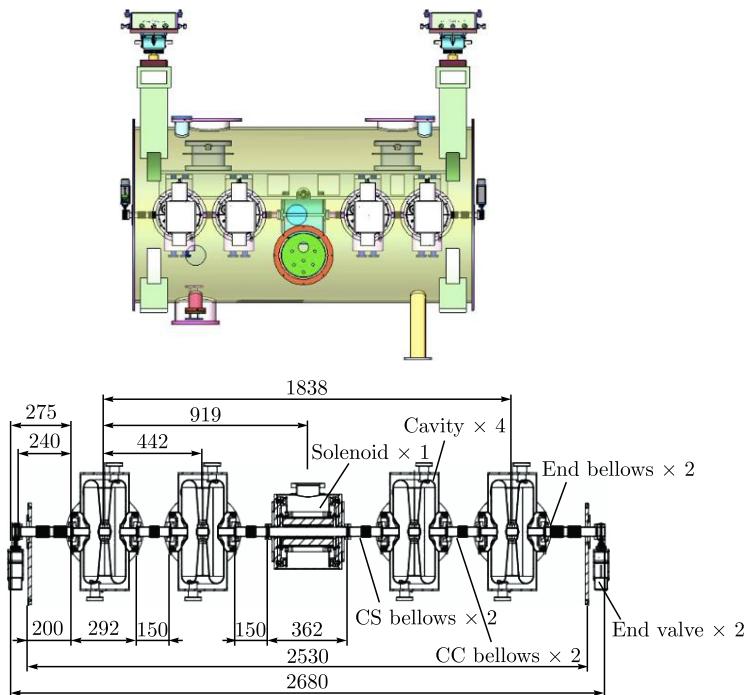


Рис. 6. Общая схема криомодуля на 4 СП-резонатора

Таблица 2. Основные параметры криомодуля

Параметр	Значение
Рабочая температура, К	LHe, 4,2
Рабочее давление, бар	1,05
Флуктуации гелия, мбар	1,5
Давление в области пролета пучка, Па	$1 \cdot 10^{-7}$
Давление изолирующего вакуума, Па	$1 \cdot 10^{-4}$
Выравнивание	Поперечное: $\pm 0,5$ мм; продольное: $\pm 1,0$ мм; угол: $\pm 5$ мрад

## ДИНАМИКА ЧАСТИЦ В УСКОРИТЕЛЕ LILac С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СЕКЦИЕЙ СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ РЕЗОНАТОРАМИ

Для двух модифицированных (с учетом утвержденных размеров криомодуля) схем компоновки канала транспортировки пучка протонов с различным положением группирующего резонатора-ребанчера (325 МГц) и резонатора-дебанчера (162,5 МГц) (рис. 7) проведено моделирование динамики частиц.

Моделирование проводилось для пучка протонов с ожидаемыми после секции ИН-3 эмиттансами, соответствующими представленным на рис. 8 [10] группам НИЯУ

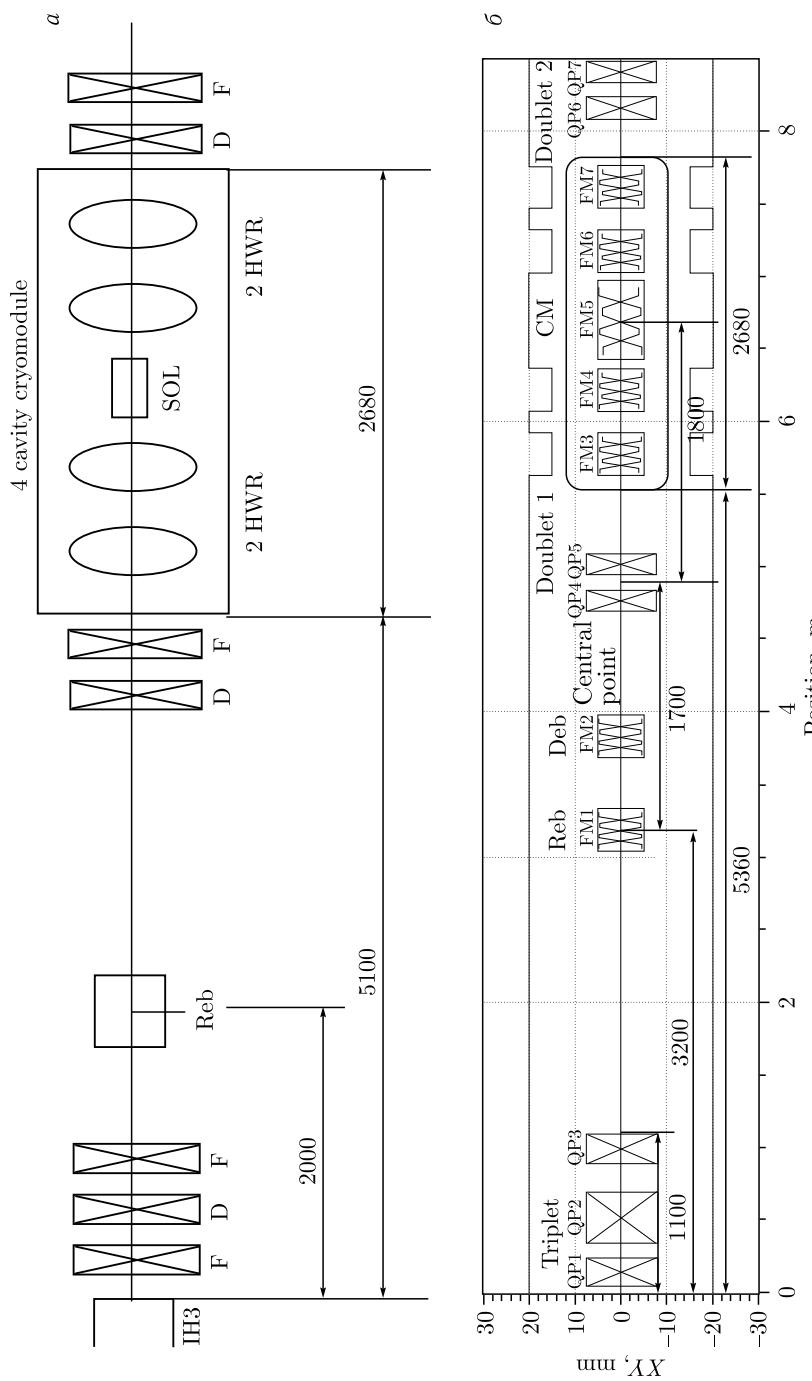


Рис. 7. Варианты схем компоновки канала транспортировки пучка протонов с различным положением группирующего резонатора-ребанчера и резонатора-дебанчера

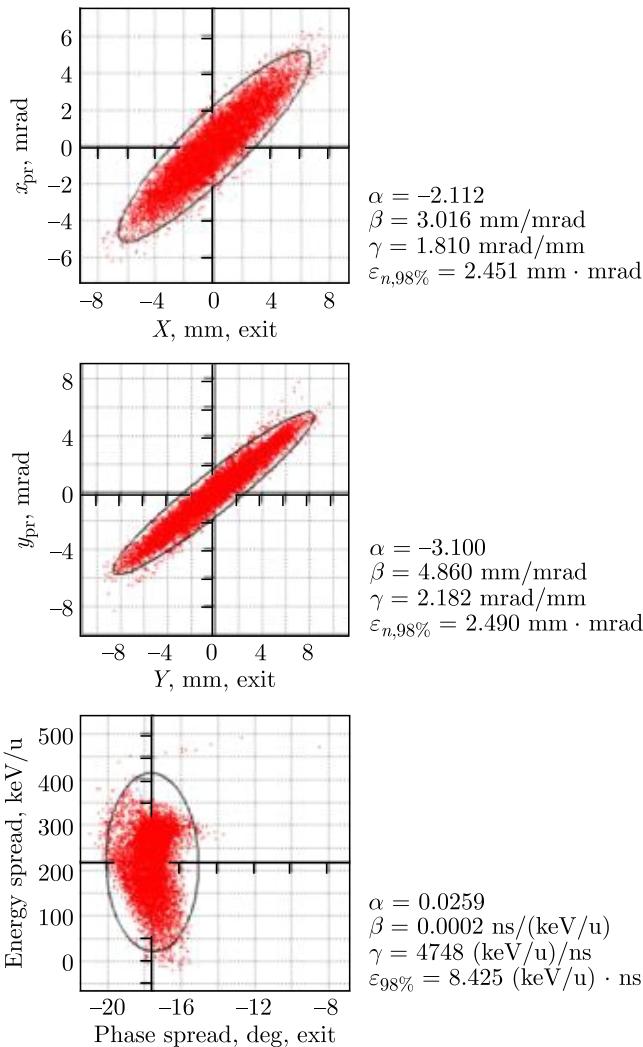


Рис. 8. Эмиттанс пучка протонов 5 мА с энергией 13 МэВ после секции IH-3

МИФИ и Института современной физики в программах BEAMDULAC и TraceWin. Полученные огибающие пучка приведены на рис. 9.

Схемы включают в себя тройку линз после секции IH-3, дуплет линз перед криомодулем, соленоид в криомодуле и дуплет линз после криомодуля. Градиент линз не более 10 Тл/м. Для обеспечения роста 4D-эмиттанса менее 25 % были выбраны значения напряжений на резонаторе-ребанчере, резонаторе-дебанчере и значение магнитного поля соленоида, располагающегося в криомодуле. Так, для схемы без резонатора-дебанчера максимальное напряжение на резонаторе-ребанчере составило 700 кВ, поле соленоида в криомодуле 2,0 Тл. Для схемы с резонатором-дебанчером: напряжение на резонаторе-ребанчере около 500 кВ, напряжение на резонаторе-дебанчере — 840 кВ, поле соленоида в криомодуле — 1,8 Тл.

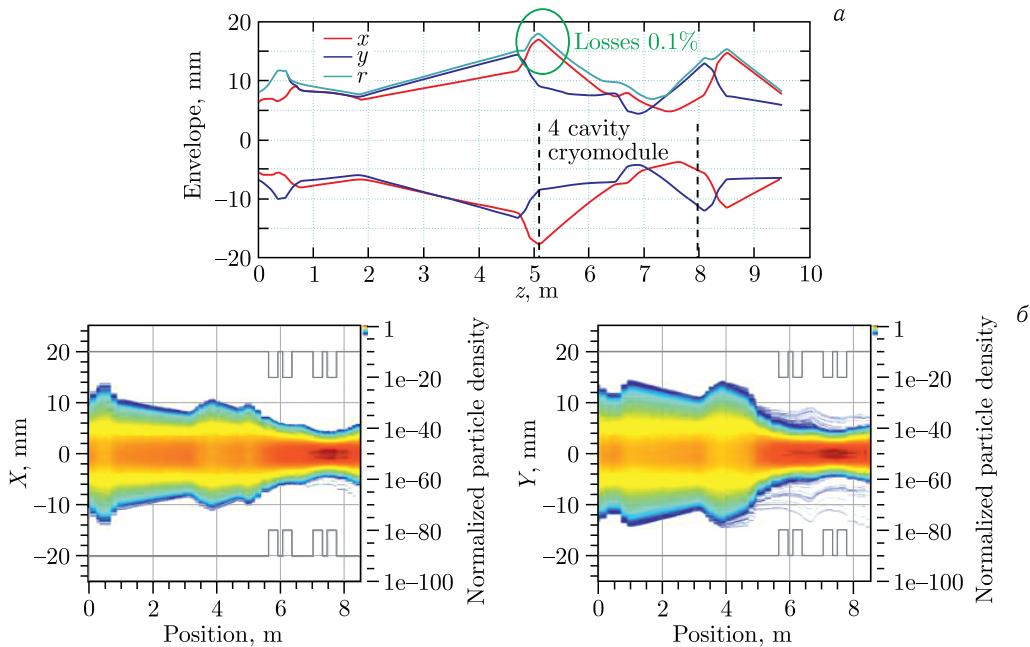


Рис. 9. Результаты расчета огибающих пучка: *а*) схема без резонатора-дебанчера; *б*) схема с резонатором-дебанчером

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием инфраструктурной базы и оборудования НИИЯП БГУ и ФТИ НАН Беларуси изготовлены и проведены успешные холдовые испытания трех сверхпроводящих резонаторов, предназначенных для экспериментальной секции со сверхпроводящими резонаторами линейного ускорителя инжекционного комплекса проекта NICA. Резонаторы подготовлены для отправки в Институт современной физики и проведения испытаний в составе криомодуля экспериментального стенда. Выполнено моделирование динамики частиц в канале транспортировки с различным положением группирующего резонатора и использованием резонатора-дебанчера. Получены требуемые значения параметров группирующего резонатора канала транспортировки и магнитной системы.

**Финансирование.** Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные и прикладные исследования на экспериментальном комплексе класса мегасайенс NICA (ОИЯИ)» № FSWU-2025-0014.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://nica.jinr.ru/>.
2. Kekelidze V. D., Lednický R., Matveev V. A. et al. Three Stages of the NICA Accelerator Complex // Eur. Phys. J. A. 2016. V. 52. P. 211.
3. Bazanov A. M., Butenko A. V., Golovenskiy B. V. et al. The New Light-Ion Linac for the NICA Collider // AIP Conf. Proc. 2019. V. 2163. P. 080001.

4. *Trubnikov G. V., Butenko A. V., Emelianov N. et al.* Status of R&D on New Superconducting Injector Linac for Nuclotron–NICA // Proc. IPAC'17, Copenhagen, Denmark, May 2017. WEPVA014. P. 3282–3285.
5. *Trubnikov G. V., Kulevoy T. V., Polozov S. M. et al.* New Superconducting Linac Injector Project for Nuclotron–NICA: Current Results // Proc. RuPAC'16, St. Petersburg, Russia, Nov. 2016. THPSC041. P. 626–628.
6. *Polozov S. M. et al.* Status of R&D on New Superconducting Injector Linac for Nuclotron–NICA // Proc. HB'18, Daejeon, Korea, June 2018. TUA2WC02. P. 83–87.
7. *Butenko A., Syresin E., Trubnikov G. et al.* Status of the SC HWR Cavities Production for NICA Project // Proc. 27th Russ. Part. Accel. Conf. “RuPAC2021”, Alushta, Russia, 2021. THA01. P. 85–88.
8. *Bychanok D., Sukhotski A., Huseu S. et al.* Electromagnetic Properties Control during Prototyping, Fabrication and Operation of Low- $\beta$  325 MHz Half-Wave Resonators // J. Phys. D. 2021. V. 54, No. 25. P. 255502.
9. *Bychanok D., Gurnevich E., Sukhotski A. et al.* Quality Factor Characterization of Superconductive Low-Beta 325 MHz Half-Wave Resonators at Low Microwave Field Amplitudes // Proc. 28th Russ. Part. Accel. Conf., Sept. 11–15, 2023. ID167. P. 177–179.
10. LILac Beam Dynamics. JINR Internal Report.

Получено 28 октября 2024 г.